خواص اتصال غیرمشابه مس به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ توسط جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ*

امید توکلی دهقی[۱]   مهدی رفیعی[۲]

چکیده

در این تحقیق خواص اتصال غیر مشابه مس خالص به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ توسط جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از قطعات جوشکاری شده با فلزات پرکننده اینکونل ۶۲۵ و فولاد زنگ نزن 309L، دو نمونه تهیه گردید. ریزساختار و خواص مکانیکی هر دو نمونه توسط آزمون های متالوگرافی، کشش و ریزسختی سنجی مشخصه یابی شد. در جوشکاری با فلز پرکننده ERNiCrMo3 ترک انجمادی در فلز جوش مشاهده گردید در حالی که با فلز پرکننده ER309L، ساختار جوش کاملاً آستنیتی و بدون ترک بود. همچنین در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L شکست در منطقه متاثر از حرارت فلز مس اتفاق افتاد. با توجه به نتایج آزمون های صورت گرفته فولاد زنگ نزن 309L، به‌عنوان فیلر مناسب برای این اتصال پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی جوشکاری غیرمشابه، اینکونل ۶۲۵، فولاد زنگ نزن 309L، فولاد زنگ نزن ۳۰۴، جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ.

Dissimilar Joint Properties of Cu to 304 Stainless Steel by GTAW Process

O. Tavakkoli Dehaghi   M. Rafiei

Abstract

In this research, the microstructure and properties of dissimilar joint of pure Cu to 304 stainless steel by GTAW process, were studied. For this purpose, the welded specimens with Inconel 625 and 309L stainless steel filler metals, were prepared. Then, the microstructure and mechanical properties of these specimens were investigated by optical microscopy, tension and microhardness tests. In welding with ERNiCrMo3 filler metal, solidification crack was seen in the weld metal while in welding with ER309L filler metal, the austenitic microstructure was without any crack. Also, in welding with ER309L filler metal, the fracture occurred in HAZ of Cu base metal. Based on the results of tests, the ER309L filler metal was proposed for the welding of pure Cu to 304 stainless steel.

Keywords Dissimilar Welding, Inconel 625, 309L Stainless Steel, 304 Stainless Steel, GTAW.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۵/۵/۲۲ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۵/۹/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

Email: m.rafiei@pmt.iaun.ac.ir

DOI: 10.22067/ma.v30i2.58138

مقدمه

اتصال فلزات غیرمشابه به یکدیگر به منظور دستیابی به خواص مختلف این فلزات در یک ترکیب، امری رایج در صنایع مختلف است [1]. این نوع اتصالات معمولاً در نیروگاه های تولید انرژی، صنایع فولاد، صنایع شیمیایی، صنایع الکترونیک و نیروگاه های هسته ای مورد توجه اند. خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت فلزات غیرمشابه انجام فرایند جوشکاری بین مواد مختلف را با مشکل همراه می کند. همچنین پارامترهای متفاوتی وجود دارد که جوش پذیری فلزات غیر همجنس را تحت تاثیر قرار می دهد که از آن جمله می توان به شعاع اتمی، ساختار کریستالی و انحلال پذیری فلزات در حالت مذاب و جامد اشاره کرد [2,3]. نفوذ عناصر آلیاژی در حوضچه مذاب معمولاً سبب تشکیل فازهای بین فلزی مختلف می شود. بسیاری از این فازهای بین فلزی، ساختاری ترد و سخت دارند که به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و انعطاف پذیری اتصالات را تحت تاثیر قرار می‌دهد [4-6]. فولادها نقش مهمی در صنایع مختلف ایفا می کنند و تقریباً در تمام صنایع، کاربردهای فراوانی دارند. فولادهای زنگ نزن نیز از جمله آلیاژهایی هستند که به طور گسترده در صنایع، مورد استفاده قرار می گیرند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی تقریباً دو سوم از کل تولیدات فولادهای زنگ نزن را به خود اختصاص داده اند. این نوع فولادها نسبت به دیگر نمونه های زنگ نزن به دلیل جوش پذیری مناسبی که دارند بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [7,8]. مس و آلیاژهای آن نیز از جمله مواد مهندسی هستند که کاربرد بسیار زیادی در صنایع مختلف دارند. ترکیبی از خواص مختلف مانند استحکام، هدایت الکتریکی و گرمایی، مقاومت به خوردگی، قابلیت ماشین کاری و انعطاف پذیری، سبب شده تا این فلز کاربردهای متنوعی در صنایع داشته باشد [9]. فولادهای زنگ نزن در مقایسه با مس و آلیاژهای آن هدایت الکتریکی و گرمایی کمتری دارند. وقتی که این نوع فولادها در دماهای بالا به کار گرفته می شوند هدایت گرمایی کم آن ها باعث می شود تا پخش و هدایت گرما به کندی صورت گیرد [10]. اتصال این فولادها به مس و آلیاژهای آن باعث افزایش هدایت حرارتی آنها می شود. در این حالت از تشکیل فازهای مخرب از قبیل فاز سیگما در کاربردهای دما بالا جلوگیری می شود [11]. با این وجود، هدایت حرارتی بالای مس سبب ایجاد محدودیت هایی در عملیات جوشکاری آن ها شده است. به عبارت دیگر، هدایت حرارتی بالای مس باعث افت گرمای منطقه جوش شده و رسیدن به دمای ذوب را به تاخیر می اندازد [12]. همچنین در جوشکاری غیر مشابه، یکی از مهمترین مسائل انتخاب یک فلز پرکننده مناسب جهت دستیابی به خواص اتصال مناسب است [13].

چن و همکارانش [1] تاثیر پارامترهای جوش لیزر را بر جوشکاری فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به مس مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد که دو فلز مس و آهن با هم به خوبی ترکیب می شوند. فرایند جوشکاری لیزر منجر به درشت شدن اندازه دانه ها در منطقه متاثر از حرارت و همچنین ذوب شدن مس شد. غلامی و همکارانش اتصال مس به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به روش جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ با فلزهای پرکننده متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه این اتصال کاهش عیوب مختلف در محل اتصال فلز پرکننده مس بود. در این فرایند اتصال، از دو نوع فلز پرکننده Ni-Cu-Fe و فلز پرکننده مس خالص استفاده شد. در آزمایشات صورت گرفته مشاهده گردید که فلز پرکننده مس خالص بهترین گزینه می باشد. همچنین تشکیل ترکیب Fe-Cu در فصل مشترک فولاد زنگ نزن و فلز پرکننده مس سبب ایجاد بیشترین سختی در منطقه ذوب شد [4]. دورگوتلو و همکارانش اتصال فلز مس را به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ توسط روش جوشکاری انفجاری مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد که فلز مس قابلیت اتصال به فولاد زنگ نزن را دارا می باشد، بدون اینکه هیچ گونه ساختار بین فلزی ایجاد شود [5]. گورام و همکارانش [7] اثر افزودن فلز مس و آلومینیوم را روی خواص مکانیکی و رفتار خوردگی فولاد AISI 430 به روش جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ مورد بررسی قرار دادند. فلز مس به صورت فویل و فلز آلومینیوم به صورت پودر به میزان ۱–۳ گرم میان محل اتصال فولاد زنگ نزن ۴۳۰ قرار گرفت. مشاهده شد زمانی که پودر آلومینیوم به میزان ۲ گرم به محل اتصال اضافه می شود میزان استحکام و انعطاف پذیری جوش افزایش پیدا می

کند. در خصوص وجود خوردگی حفره ای، سطح نمونه مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در صورت اضافه کردن ۲ گرم فلز مس و آلومینیوم و سپس انجام عملیات حرارتی، مقاومت به خوردگی حفره ای افزایش پیدا می کند. تینگ و همکارانش [8] اثر فلز پر کننده مس را روی ریز ساختار و خواص مکانیکی فلز تیتانیوم و فولاد زنگ نزن به روش پرتو الکترونی مورد بررسی قرار دادند. به دلیل حلالیت کم این دو ماده در دمای اتاق، اتصال آنها در حالت جامد خیلی مشکل می باشد و اتصال آن ها تولید ترکیبات ترد می کند، در حالی که اتصال Fe-Cr-Ti ایجاد یک ساختار بین فلزی کرده و منجر به افت خواص محل اتصال می شود. توماسوک و همکارانش [9] خواص اتصال فولاد زنگ نزن 316L و آلیاژ Ti6-Al4-6V را با روش جوشکاری لیزر با لایه واسطه وانادیوم خالص مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد اتصال مستقیم فلز تیتانیوم به فولاد، تولید یک فاز ترد و شکننده می کند. قرار دادن یک لایه واسطه در فصل مشترک فولاد زنگ نزن و آلیاژ Ti6-Al4-6V می تواند شرایط را بهبود بخشد. کومار و همکارانش اثر حرارت ورودی بر روی ریز ساختار فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را به روش جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ مورد بررسی قرار دادند و مشاهده شد در صورت استفاده از حرارت کم، مقدار مقاومت کششی نسبت به حرارت ورودی متوسط و بالا بیشتر می باشد. در صورت افزایش میزان حرارت ورودی اندازه ذرات در منطقه ذوب نسبت به منطقه متاثر از حرارت درشت می شود [10]. این موضوع در مطالعات دیگران هم اشاره شده است [14]. با توجه به مطالعات مرور شده، مشخص شد که مطالعه مشخصی در زمینه جوشکاری ذوبی فولاد زنگ نزن ۳۰٤ به مس خالص با استفاده از الکترودهای زنگ نزن ۳۰۹ کم کربن و همچنین اینکونل ٦٢٥ انجام نشده است، بنابراین در این تحقیق به بررسی ریزساختار و خواص اتصال غیر مشابه مس خالص به فولاد زنگ نزن ۳۰٤ با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ پرداخته شده است و اثر این دو نوع فلز پرکننده روی خواص اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

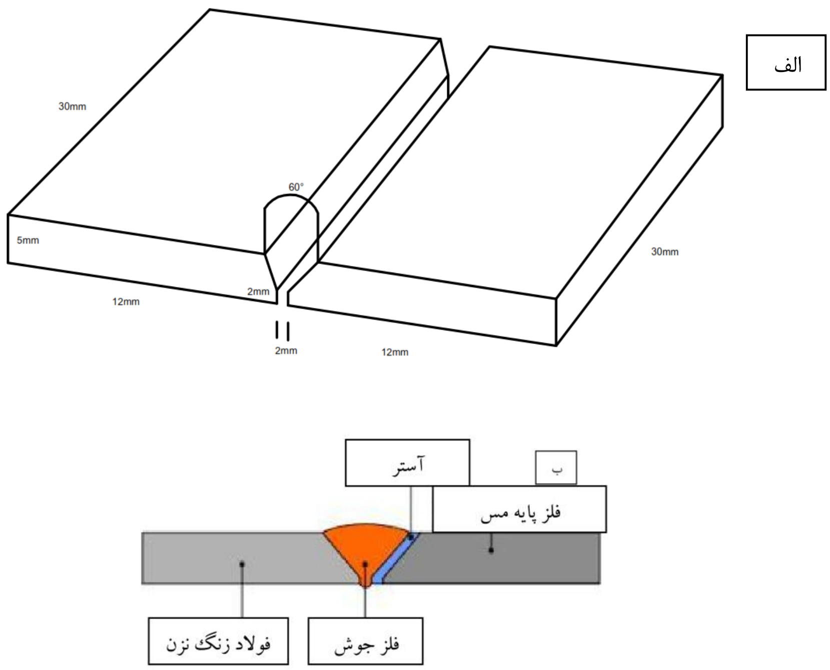
مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فلزات پایه فولاد زنگ نزن ۳۰٤ و مس خالص و دو فلز پرکننده مختلف اینکونل ٦٢٥ (ERNiCrMo3) و فولاد زنگ نزن ۳۰۹ (ER309L) استفاده شد. جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده مصرفی را نشان می دهد.

نمونه‌های جوشکاری، از هر دو فلز پایه، به شکل ورق با طرح اتصـــال جناغی یک طرفه با زاویه٦٠ درجه آماده گردید و عملیات پخ ســازی نمونه ها توســط ســنگ جت انجام شد. جهت انجام فرایند جو شکاری با ا ستفاده از فلز پرکننده ER309L، از آ ستر اینکونل ٦٢٥ ا ستفاده شد. طرح اتـصال و طرح قرار گیری لایه وا سطه بر روی هر دو سطح فلزات فولاد زنگ نزن ۳۰٤ و مس مورد اســـتفاده به ترتیب در شکل (۱- الف و ب) نـشان داده شده ا ست. به منظور انجام جوشکاری، نمونه های تهیه شده از هر دو آلیاژ پایه به صـــورت لب به لب و با فاصـــله ۲ میلیمتر در کنار هم قرار گرفتند و جوشـــکاری نمونه ها با پیش گرم کردن فلز پایه مس خالص و با روش جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ با قطبیت منفی (DCEN–GTAW) انجام شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پرکننده

درصد وزنی عناصر	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
AISI304	0.04	1.7	0.48	0.016	0.005	19.55	8.23	0.3	0.7	Bal.
Cu	–	–	–	≤0.001	≤0.002	–	≤0.002	–	≥99.99	≤0.002
ER309L	0.03	2.2	0.6	0.03	0.03	23	13.5	0.75	0.5	Bal.
ERNiCrMo3	0.015	0.02	0.1	0.005	0.005	22	65	9	0.2	0.3



شکل ۱ (الف) طرح اتصال فولاد زنگ نزن ۳۰٤ و فلز مس خالص تجاری و (ب) طرح قرار گیری لایه آستر بر روی سطح مس

در جداول (۲) و (۳) به ترتیب پارامترهای جوشکاری و کد گذاری دو فلز پر کننده مورد استفاده نشان داده شده است. پس از اتمام جوشکاری، جوش ها در هوا خنک شدند و هیچ گونه عملیات حرارتی پس از جوشکاری روی آنها انجام نشد. به منظور بررسی ریز ساختار نمونه ها، پس از عملیات جوشکاری، قطعات مورد نیاز برای متالوگرافی تهیه و مانت گرم شدند و بعد از پولیش شدن، توسط محلول اسید نیتریک اچ گردیدند. سپس بوسیله میکروسکوپ نوری فلزات پایه و جوش از لحاظ ریز ساختار مورد مطالعه قرار گرفت.

جهت بررسی خواص مکانیکی فلزات پایه و فلز جوش از آزمون های مکانیکی کشش و سختی سنجی استفاده شد. برای تعیین خواص کششی، نمونه هایی مطابق استاندارد ASME بخش نهم تهیه گردید. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه آزمون کشش بر روی نمونه ها اعمال گردید. سپس میزان استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه ها محاسبه و گزارش گردید. ریزسختی سنجی مقطع جوش در مقیاس ویکرز و با بار ۱۰۰ گرم انجام گرفت.

جدول ۲ پارامترهای جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ فولاد زنگ نزن ۳۰٤ و فلز مس خالص تجاری

پارامتر	مقدار
جریان جوشکاری (آمپر)	۲۰۰
گاز محافظ	آرگون
جریان گاز ($Lit.min^{-1}$)	۱۲
تعداد پاس جوشکاری	۳
ضخامت ورق (میلیمتر)	۵
دمای پیشگرم (درجه سانتیگراد)	۲۵۵
ولتاژ (ولت)	۲۷
قطر فیلر (میلیمتر)	۲/۵
الکترود	تنگستن+۲ درصد توریا
قطر نازل (میلیمتر)	۸

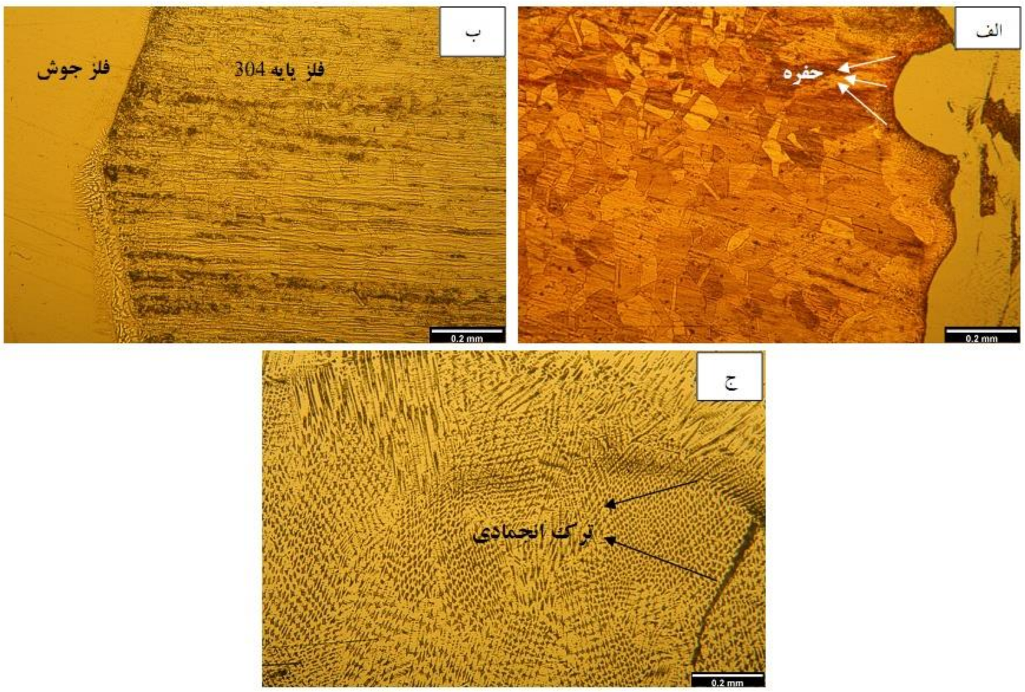
جدول ۳ کد گذاری نمونه های جوشکاری شده

کد نمونه	نوع فلز پرکننده
۱	ERNiCrMo3
۲	ER309L

نتایج و بحث

بررسی ریز ساختار

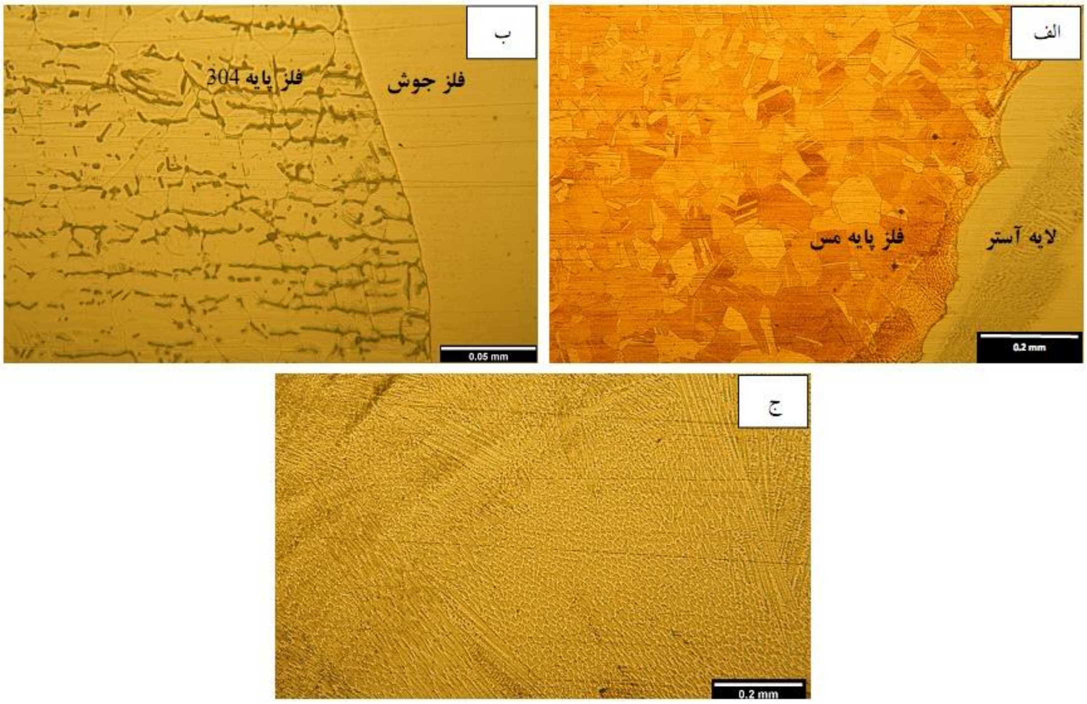
شکل (۲) ریزساختار نمونه شماره ۱ را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۲- الف) مشاهده می شود، در منطقه ذوب جزئی فلز پایه مس تعدادی حفره وجود دارد. تشکیل این حفرات را می توان به سرعت سرمایش بالا ناشی از هدایت گرمایی بالای مس و همچنین به دام افتادن گاز محافظ درون فلز جوش نسبت داد [4]. از طرفی حرارت ورودی بالا در منطقه متاثر از حرارت ، همچنین منجر به درشت شدن اندازه دانه های فلز مس در این منطقه شده است. همانطور که در اشکال (۲) و (۳- الف) مشاهده می شود دانه های منطقه متاثر از حرارت فلز پایه مس نسبت به بقیه قسمت های فلز پایه رشد بیشتری داشته اند. وجود فصل مشترک شارپ و همچنین دانه های درشت یکپارچه در نزدیکی فصل مشترک مس و فلز جوش نشان دهنده ذوب جزئی فلز مس در حین فرایند جوشکاری به علت هدایت حرارتی بالای این فلز می باشد که این امر رسیدن به دمای ذوب را مشکل می سازد. البته در اثر فرایند پیشگرم احتمال تشکیل لایه های اکسیدی روی سطح مس وجود دارد که این مورد نیز به وقوع ذوب جزئی کمک می کند. چن و همکارانش [1] نیز به عدم ذوب شدن مس در جوشکاری مس به فولاد زنگ نزن با استفاده از فرایند جوشکاری لیزر اشاره کرده اند. در سمت فلز مس در فصل مشترک فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت رشد دندریت ها مشاهده می شود ولی به علت بالا بودن ضریب انتقال حرارت در فلز مس این دندریت ها رشد زیادی نداشته اند. در شکل (۲- ب) مشاهده می شود که فلز پایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ دارای زمینه آستنیتی به همراه مقداری فریت است. در سمت مربوط به فلز پایه فولاد زنگ نزن، ناحیه جوش عاری از هرگونه عیب است و یک فصل مشترک نفوذی مناسب ایجاد شده است.



شکل ۲ (الف) ریزساختار منطقه متاثر از حرارت فلز مس و فصل مشترک فلز جوش در بزرگنمایی 100 x، (ب) ریزساختار منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ نزن و فصل مشترک فلز جوش در بزرگنمایی 100 x و (ج) ریزساختار فلز جوش در بزرگنمایی 500 x با فلز پرکننده اینکونل ٦٢٥

در شکل (٢– ج) نیز دندریت های هم محور بسیار ریز آستنیتی مشاهده می شوند که باعث ایجاد یک ساختار زیردانه آستنیتی در فلز جوش شده است. در واقع به علت سرعت سرد شدن بالای فلز جوش در اثر ضریب انتقال حرارت بالای فلز مس، پارامتر انجمادی G/R کاهش یافته و این باعث ایجاد دندریت های هم محور ریز در فلز جوش می شود. با توجه به بالا بودن سرعت سرمایش در فلز مس و وجود تنش های حرارتی در منطقه جوش، وجود ترک انجمادی کاملاً مشهود بود. غلامی و همکارانش نیز به وجود ترک های انجمادی در جوشکاری فلز مس به فولاد زنگ نزن ٣٠٤ با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن و گاز محافظ اشاره کردند [4].

شکل (٣) ساختار میکروسکوپی نمونه شماره ٢ را نشان می دهد. همانطور که در شکل (٣– الف) دیده می‌شود، شرایط از نظر ریز ساختاری مانند شکل (٢– الف) می باشد. در فصل مشترک فلز مس و فلز جوش دانه های ریز فلز مس در اثر سرعت سرد شدن بالا در این ناحیه مشاهده می شود. همچنین در این نمونه به علت وجود آستر روی فلز مس، فصل مشترک مناسب تر و با امتزاج بیشتری بین مس و فلز جوش ایجاد شده است. در شکل (٣– ب) ساختار آستنیتی در فلز پایه ٣٠٤ مشاهده می شود، ولی به علت بالا بود میزان حرارت ورودی فاز فریت دلتا با مورفولوژی اسکلتی شکل در مرزدانه های آستنیت ایجاد شده است. تشکیل انواع مختلف فریت در فولادهای زنگ نزن به نسبت کروم به نیکل معادل مربوط می باشد. در واقع این نسبت تعیین کننده نوع فریت تشکیل شده در اثر حرارت دهی می باشد. مقدار این فریت چنانچه در محدوده مناسب باشد (٥ تا ١٠ درصد) می تواند به جلوگیری از ایجاد ترک گرم کمک کند. ریز ساختار در شکل (٣–ج) یک ساختار کاملا آستنیتی با دانه های هم محور ریز را در فلز جوش نشان می دهد. هیچ گونه ترک انجمادی در فلز جوش مشاهده نشد.



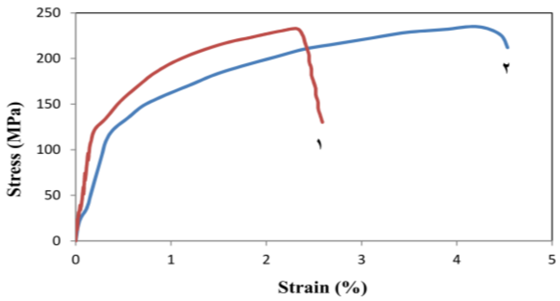
شکل ٣ (الف) ریزساختار منطقه متاثر از حرارت فلز مس و لایه آستر در بزرگنمایی 100 x، (ب) ریزساختار منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ نزن و فصل مشترک فلز جوش در بزرگنمایی 100 x و (ج) ریزساختار فلز جوش در بزرگنمایی 500 x با فلز پرکننده 309L

خواص مکانیکی

خواص مکانیکی فلزات جوش حاصل از دو فلز پرکننده اینکونل ٦٢٥ و فولاد زنگ نزن 309L به همراه نمودار تنش-کرنش حقیقی به ترتیب در جدول (٤) و شکل (٤) نشان داده شده است. از داده های جدول مشاهده می شود که استحکام کششی و تسلیم فلز جوش فولاد زنگ نزن 309L نسبت به آلیاژ اینکونل کمی بیشتر می باشد. همچنین شکست نمونه ۱، در فصل مشترک فلز مس و فلز جوش اتفاق افتاد، که علت را می توان، بالا بودن سرعت سرمایش در فلز مس، ذوب جزئی فلز مس در این ناحیه و همچنین وجود عنصر Cr در فلز پرکننده اینکونل ٦٢٥ دانست که با توجه به حلالیت خیلی کم دو آلیاژ مس و کرم در یکدیگر طبق نمودار فازی دوتایی، منجر به ایجاد ترکیبات بین فلزی در این ناحیه می گردد. از طرفی وجود حفرات (شکل ۲ -الف)) در نزدیکی فصل مشترک مس و فلز جوش اینکونل نیز می تواند عامل مهمی در شکست این ناحیه در حین آزمون کشش باشد. شکست نمونه ۲، در فلز مس در مجاورت متاثر از حرارت رخ داد که علت آن ترد شدن منطقه متاثر از حرارت در اثر درشت شدن دانه ها است. در این نمونه همانطور که قبلا بیان شد به دلیل امتزاج بهتر فلز مس با فلز جوش، فصل مشترک از استحکام بالاتری برخوردار است. همانطور که از منحنی تنش-کرنش حقیقی مشخص است، نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ دارای چقرمگی شکست بالاتری (سطح زیر منحنی بیشتر) می باشد. علت این موضوع را می توان به عدم ایجاد ترک انجمادی در جوشکاری با فیلر فولاد زنگ نزن 309L نسبت داد، در حالیکه فلز جوش حاصل از فیلر اینکونل ٦٢٥ به دلیل وجود ترک انجمادی چقرمگی شکست کمتری از خود نشان داد. بنابراین می توان گفت فلز پرکننده 309L نسبت به آلیاژ اینکونل ٦٢٥ با توجه به استحکام کششی، تسلیم و چقرمگی شکست، شرایط بهتری را ایجاد می کند.

جدول ٤ مقادیراستحکام تسلیم و کششی در نمونه های جوشکاری شده

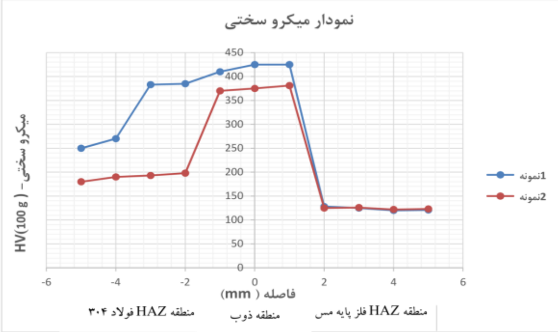
نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۱	۱۳٥	۲۲۹
۲	۱٤٤	۲۳٥



شکل ٤ نمودار تنش-کرنش حقیقی برای نمونه های جوشکاری شده با فلزات پرکننده شماره ۱ و ۲

ریزسختی سنجی

نتایج ریزسختی جوش های حاصل از فیلرهای مختلف در شکل (٥) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در هر دو نمونه سختی ناحیه‌ی جوش از منطقه متاثر از حرارت بیشتر است. تفاوت سختی در ناحیه اتصال با ورق های مسی چشم گیر بود که این امر همانطور که قبلا اشاره شد به دلیل ذوب جزئی مس در این ناحیه و ایجاد یک فصل مشترک شارپ بین مس و فلز جوش می باشد. میزان سختی با رسیدن به مرکز جوش به حداکثر مقدار خود رسیده و در ناحیه نزدیک به فولاد کاهش می یابد. سختی بالای فلز جوش در هر دو نمونه را می توان به ایجاد ساختار ریزدانه در فلز جوش مطابق با نتایج قبلی عنوان شده، نسبت داد. بیشترین مقدار سختی برای اتصالات، در فلز جوش حاصل از فیلر اینکونل مشاهده شد. علت سختی بالاتر فلز جوش حاصل از جوشکاری با فلز پرکننده اینکونل ٦٢٥ را می توان به سختی بالاتر خود این آلیاژ در مقایسه با فولاد زنگ نزن ۳۰۹ و همچنین ساختار ریزتر فلز جوش در مقایسه با فلز پرکننده 309L نسبت داد.



شکل ۵ پروفیل تغییرات سختی از مرکز ناحیه متاثر از حرارت به‌سمت فلز جوش

نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰٤ و فلز مس خالص تجاری با استفاده از دو فلز پرکننده ER-309L و ERNiCrMo3پرداخته شد. مهمترین دست آوردهای این پژوهش عبارتند از:

۱. وجود فصل مشترک شارپ و همچنین دانه های درشت یکپارچه در نزدیکی فصل مشترک مس و فلز جوش در هر دو فلز پرکننده نشان دهنده ذوب جزئی فلز مس در حین فرایند جوشکاری به علت هدایت حرارتی بالای این فلز می باشد.

۲. با توجه به بالا بودن سرعت سرمایش در فلز مس و وجود تنش های حرارتی در منطقه جوش وجود ترک انجمادی در فلز جوش حاصل از فیلر اینکونل ٦٢٥ کاملاً مشهود بود در حالیکه در فلز جوش حاصل از جوشکاری با فیلر 309L ترک انجمادی مشاهده نشد.

۳. نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده اینکونل ٦٢٥ از فصل مشترک مس و فلز جوش دچار شکست شد، در حالیکه برای فلز پرکننده 309L شکست در منطقه متاثر از حرارت فلز مس اتفاق افتاد. همچنین اتصال با فلز پرکننده 309L خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با فلز پرکننده اینکونل ٦٢٥ از خود نشان داد.

٤. در هر دو نمونه بیشترین مقدار سختی، در فلز جوش به علت ایجاد ساختار ریزدانه مشاهده شد. همچنین فلز جوش اینکونل سختی بالاتری از خود نشان داد.

مراجع

1. Chen S., Hung J., Xia J., Zhao X., Lin S., "Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 222, pp. 43-51, (2015).
2. Zhang B., Zhao J., Li X., Chen G., "Experimental investigation of Tie6Ale4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 80, pp. 261-268, (2015).
3. Shaibu V.B., Sahoo S.K., Kumar A., "Computational Modeling of Dissimilar Metal CO2 Laser Welding Applied to Copper and 304 Stainless Steel", *Procedia Engineeering*, Vol. 127, pp. 208-214, (2015).
4. Gholami Shiri S., Nazarzadeh M., Shaifitabar M., Shafiee M., "Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials", *Transactions of Nonferrous Metals*, Vol. 22, pp. 2937-2942, (2012).
5. Durgutlu A., Findik F., "Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding", *Materials and Design*, Vol. 26, pp. 497-507, (2005).
6. Ting W., Bing-gang Z., Guo-qing C., "Electron beam welding of Ti-15-3 titanium alloy to 304 stainless steel with copper interlayer sheet", *Transactions of the Nonferrous Metals Society*, Vol. 20, pp. 1829-1834, (2010).
7. Gurram M., Adepu K., Pinniti R., Gankidi M., "Effect of copper and aluminium addition on mechanical

properties and corrosion behaviour of AISI 430 ferritic stainless steel gas tungsten arc welds", *Journal of Materials Research Technolgy*, Vol. 2, No. 3, pp. 238-249, (2013).

8. Ting W., Binggang Z., Jicai F., Qi T., "Effect of a copper filler metal on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded titanium–stainless steel joint", *Materials Characterization*, Vol. 73, pp. 104-113, (2012).
9. Tomashchuk I., Grevey D., Sallamand P., "Dissimilar laser welding of AISI 316L stainless steel to Ti6–Al4–6V alloy via pure vanadium interlayer", *Materials Science & Engineering*, Vol. 622, pp. 37-45, (2015).
10. Kumar S., Shahi A.S., "Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3617-3623, (2011).
11. Yilmaz O., Aksoy M., "Investigation of micro-crak occurrence conditions in diffusion bonded Cu-304 stainless steel couple", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 136-142, (2002).
12. Zhang Y., Huang J., Chi, H., "Study on welding–brazing of copper and stainless steel using tungsten/metal gas suspended arc welding", *Materials Letters*, Vol. 156, pp. 7-9, (2015).
13. Hajiannia I., Shamanian M., Kasiri M.,"The Weldability Evaluation of Dissimilar Welds of AISI 347 Stainless Steel to ASTM A335 Low Alloy Steel by Gas Tungsten Arc Welding", *Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, pp. 33-40, (2013).
14. Mithilesh P., Varun D., "Investigations on Dissimilar Weldments of Inconel 625 and AISI 304", *Procedia Engineering*, Vol. 75, pp. 66-70, (2014).